

AN: PAT 2000-295032  
TI: Regulating a cooling segment of a mill train comprises individually regulating process parameters of the cooling segment by comparing the calculated temperature progression with the reference temperature progression  
PN: **EP997203-A1**  
PD: 03.05.2000  
AB: NOVELTY - Process for regulating a cooling segment of a mill train for sheets and strips comprises calculating the strip temperature progression in the cooling segment depending on the actual adjusted process parameter and the specific process state of the strip, calculating a reference temperature progression with allowance of a reference temperature (Tref), and individually regulating the process parameters of the cooling segment by comparing the calculated temperature progression with the reference temperature progression.  
DETAILED DESCRIPTION - An INDEPENDENT CLAIM is also included for a system for carrying out the process.; USE - Used for rolling sheets and strips of steel. ADVANTAGE - A quick and automatic regulation process is guaranteed.  
PA: (SCLO ) SMS DEMAG AG; (SCLO ) SMS SCHLOEMANN-SIEMAG AG;  
IN: LATZEL S;  
FA: **EP997203-A1** 03.05.2000; ES2216402-T3 16.10.2004;  
DE19850253-A1 04.05.2000; JP2000135507-A 16.05.2000;  
US6185970-B1 13.02.2001; **EP997203-B1** 11.02.2004;  
DE59908504-G 18.03.2004;  
CO: AL; AT; BE; CH; CY; DE; DK; EP; ES; FI; FR; GB; GR; IE; IT; JP; LI; LT; LU; LV; MC; MK; NL; PT; RO; SE; SI; US;  
DR: AL; AT; BE; CH; CY; DE; DK; ES; FI; FR; GB; GR; IE; IT; LI; LT; LU; LV; MC; MK; NL; PT; RO; SE; SI;  
IC: B21B-027/06; B21B-037/00; B21B-037/74; B21B-037/76; C21D-011/00; G05B-013/04;  
MC: M21-A07;  
DC: M21; P51;  
PR: DE1050253 31.10.1998;  
FP: 03.05.2000  
UP: 27.10.2004

---

**This Page Blank (uspto)**



Europäisches Patentamt

European Patent Office

Office européen des brevets



(11)

EP 0 997 203 A1

(12)

## EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG

(43) Veröffentlichungstag:  
03.05.2000 Patentblatt 2000/18

(51) Int. Cl.<sup>7</sup>: B21B 37/76, C21D 11/00

(21) Anmeldenummer: 99119331.9

(22) Anmeldetag: 29.09.1999

(84) Benannte Vertragsstaaten:  
AT BE CH CY DE DK ES FI FR GB GR IE IT LI LU  
MC NL PT SE  
Benannte Erstreckungsstaaten:  
AL LT LV MK RO SI

(30) Priorität: 31.10.1998 DE 19850253

(71) Anmelder:  
SMS SCHLOEMANN-SIEMAG  
AKTIENGESELLSCHAFT  
40237 Düsseldorf (DE)

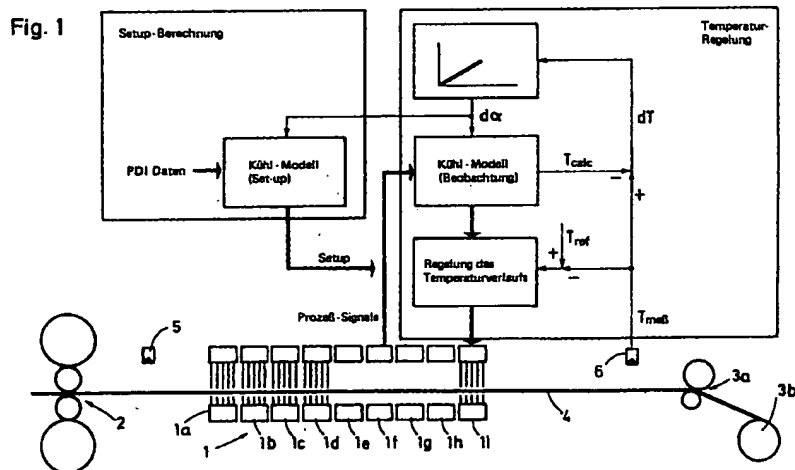
(72) Erfinder: Latzel, Siegfried  
57080 Siegen (DE)

(74) Vertreter:  
Valentin, Ekkehard, Dipl.-Ing.  
Patentanwälte  
Hemmerich-Müller-Grosse-  
Pollmeyer-Valentin-Gihske  
Hammerstrasse 2  
57072 Siegen (DE)

### (54) Verfahren und System zur Regelung von Kühlstrecken

(57) Um ein Verfahren und ein System zur Regelung einer Kühlstrecke, insbesondere der Kühlstrecke einer Walzstraße für Bleche und Bänder aus Stahl, derart zu verbessern, das die Regelung schneller und flexibler wird, soll das Gesamtsystem nicht als eine Summe einzelner Bandpunkte bzw. Segmente betrachtet wer-

den, sondern es wird der Temperaturzustand über die Länge des Bandes, d.h. die durch den Einfluß der Kühleinwirkung abfallende Temperaturkurve, mittels eines mathematischen Prozeßmodells kontinuierlich berechnet und mit einer Referenzkurve verglichen.



EP 0 997 203 A1

**Beschreibung**

**[0001]** Die Erfindung betrifft ein Verfahren sowie ein System zur Regelung einer Kühlstrecke, insbesondere der Kühlstrecke einer Anlage zum Walzen von Blechen und Bändern aus Stahl.

5 **[0002]** Während die Anforderungen an die geometrischen Abmessungen, die Oberflächenbeschaffenheit und mechanische Eigenschaften von warmgewalzten Bändern ständig steigen, wächst gleichzeitig der Wunsch nach einer höheren Flexibilität der Produktionsanlagen für eine Vielzahl von unterschiedlichen Stählen. Es besteht daher der Bedarf nach automatisch arbeitenden Kühlanlagen, die genaue Temperaturverläufe sowie verschiedene Kühlstrategien, d.h. Kühlbläufe, bei hoher Flexibilität und gleichzeitiger Produktion von Stählen hoher Qualität gewährleisten.

10 **[0003]** Die zur Realisierung solcher Anforderungen bisher entwickelten Prozeßoptimierungs- und Regelungsverfahren zur Automatisierung der laminaren Warmbandkühlstrecken beruhen üblicherweise auf mathematischen Prozeßmodellen.

**[0004]** Hierbei liegt dem klassischen Konzept die Modellierung des Gesamtsystems in Form von ideellen Bandpunkten zugrunde. Bei der Modellierung eines Bandpunktes wird berücksichtigt, daß der Bandpunkt durch Wärmeleitung, Konvektion und Strahlung Energie mit der Umgebung austauscht. Ferner wird durch Gefügetransformation innere Energie produziert. Zur Modellierung des Bandpunktes wird in Bandickenrichtung die instationäre eindimensionale Wärmeleitungsgleichung von FOURIER gelöst. Als geometrische Grenze der Modellierung dient der Ort des Fertigstraßenpyrometers, also der Eintrittsort des ideel gedachten Bandpunktes in die Kühlstrecke, sowie der Installationsort des Haspelpyrometers. Zwischen diesen beiden Orten kann durch örtlich verteilte Stelleingriffe die Solltemperatur des Bandes eingestellt werden.

20 **[0005]** Hierbei sind zwei unterschiedliche Ansätze bekannt geworden: zum einen ist das Prozeßmodell in einen Regelkreis eingebunden, zum anderen ist es von diesem getrennt. Im zweiten Fall kommt es vor Einlauf des zu kühlenden Bandes zu einer Voreinstellung der Stellsysteme der Kühlstrecke (Setup), wobei eine Vorsteuerung und Regelung während des Walzens nur noch zur Ausregelung verbleibender Störgrößen sowie von ungenauen Setup-Einstellungen dienen.

**[0006]** In beiden Fällen werden einzelne Bandabschnitte in Segmente aufgeteilt und beim Transport durch die Kühlstrecke verfolgt. Diesen Segmenten werden die jeweils gemessenen Prozeß- und Stellsignale zugeordnet.

**[0007]** Nachdem ein Segment das Haspelpyrometer erreicht hat, wird im ersten Fall eine Rückrechnung dieses Segmentes mit Hilfe des Prozeßmodells durchgeführt. Die sich ergebende Differenz zwischen gemessener und berechneter Haspeltemperatur wird adaptiert und für eine sich anschließende angepaßte Einstellung der Stellsysteme unter Beachtung des aktuellen Prozeßzustands (Fertigstraßentemperatur, Bandgeschwindigkeit usw.) berücksichtigt. Dieser Berechnungsablauf wird während des Walzvorgangs zyklisch wiederholt.

**[0008]** Die Modelladaption dient bekanntermaßen dazu, die Vorhersagegenauigkeit des Kühlmodells zu erhöhen. Hierbei wird das Berechnungsergebnis des Modells ständig mit den tatsächlichen, gemessenen Kühlergebnissen verglichen und eine Fehlerminimierung durchgeführt.

35 **[0009]** Dieses klassische Konzept zeigt zum einen den Nachteil, daß aufgrund der Integration der Bandsegmente eine große Anzahl von Daten ermittelt und verarbeitet werden muß. Daneben sind die Stellsysteme der Kühlvorrichtung, beispielsweise die örtliche Verteilung des Kühlwassers und die Anzahl der betätigbaren Kühlbalken, nicht flexibel und schnell genug regelbar. Es besteht folglich die Gefahr, daß Bandabschnitte bei einer schnellen Änderung der Bandgeschwindigkeit unterkühlt bzw. überhitzt werden.

40 **[0010]** Ausgehend von diesem Stand der Technik ist es Aufgabe der vorliegenden Erfindung, ein Verfahren sowie ein System zur Regelung einer Kühlstrecke, insbesondere einer Kühlstrecke von Walzanlagen, zu schaffen, die einen schnellen und automatischen Regelvorgang gewährleisten und den datenlogistischen Aufwand verringern.

**[0011]** Diese Aufgabe wird mittels des Verfahrens mit den Merkmalen nach Anspruch 1 sowie nach Anspruch 8 gelöst. Vorteilhafte Merkmale sind in den Unteransprüchen offenbart.

45 **[0012]** Das vorgeschlagene Verfahren geht von dem Grundgedanken aus, das Gesamtsystem der Kühlstrecke nicht als eine Summe einzelner Bandpunkte bzw. Segmente zu betrachten, sondern den Temperaturzustand des Bandes über die Länge der Kühlstrecke, d.h. die durch den Einfluß der Kühleinwirkung abfallende Temperaturkurve, mittels eines mathematischen Prozeßmodells kontinuierlich zu berechnen bzw. zu beobachten, diese Temperaturkurve mit einer Referenz-Temperaturkurve zu vergleichen und die Regelabweichungen über die Kühlstreckenlänge individuell auszuregeln. Das Modell, das der Berechnung zugrundeliegt, wird hierbei vorzugsweise kontinuierlich adaptiert.

50 **[0013]** Der erfindungsgemäß vorgeschlagene Regelkreis setzt sich aus den nachfolgenden während des Kühlprozesses zyklisch ablaufenden Schritten zusammen:

55 Berechnung des Bandtemperaturverlaufs in der Kühlstrecke in Abhängigkeit der aktuellen Prozeßparameter sowie des spezifischen Prozeßzustandes des Bandes,

vorzugsweise die Adaption des der Berechnung zugrundeliegenden Modells mittels eines konkret aufgenomme-

nen Temperatur-Meßwertes  $T_{\text{meß}}$  durch Veränderung der Modellparameter mit dem Ziel der Fehlerminimierung des Modells,

5 Vorausberechnung eines Referenztemperaturverlaufs mit fehlerminimiertem Modell unter Zugrundelegen einer vorgegebenen Referenztemperatur  $T_{\text{ref}}$ ;

individuelle Regelung der Prozeßparameter der Kühlstrecke durch Vergleich des Referenztemperaturverlauf mit dem berechneten Temperaturverlauf.

10 **[0014]** Hierbei erfolgt die Berechnung des Bandtemperaturverlaufs wirklichkeitsnah. Auf Basis des vorzugsweise fehlerminimierten Modells wird der Referenztemperaturverlauf vorausberechnet.

**[0015]** Bei dem vorgeschlagenen Modell, das dem Verfahren zugrundeliegt, entfällt die Unterteilung des Bandes in einzelne Segmente, wie es das klassische Modell vorsieht. Daher wird die Datenmenge übersichtlicher und der datenlogistische Aufwand deutlich geringer. Zudem erlaubt das vorgeschlagene Verfahren deutlich kürzere Ausregelzeiten, da die Berücksichtigung langer Datentransportzeiten entfällt.

15 **[0016]** Unter dem Begriff Prozeßparameter iS. des Anspruchs 1 werden die aktuellen Einstellungen der Kühlstrecke verstanden. Dies sind beispielsweise die Anzahl der aktivierten Kühlbalken und/oder die Menge bzw. die Geschwindigkeit des Kühlwassers sowie die Kühlwassertemperatur. Die Regelung dieser Stellglieder der Kühlstrecke erfolgt individuell und zwar in Anpassung an die Referenztemperaturkurve und erlaubt somit eine größere Schnelligkeit und Flexibilität der einzelnen Stellglieder.

20 **[0017]** Unter spezifischem Prozeßzustand werden in diesem Zusammenhang die Eigenschaften des zu kühlenden Bandes verstanden, wie die Bandgeschwindigkeit, die Banddicke, die Fertigstraßentemperatur oder die Materialeigenschaften des Bandes.

**[0018]** Bei dem konkret gemessenen Temperaturmeßwert  $T_{\text{meß}}$  bzw. bei der vorgegebenen Referenztemperatur  $T_{\text{ref}}$  handelt es sich vorzugsweise um die Ist- bzw. Solltemperatur des zu kühlenden Gutes kurz vor Eintritt in die Haspelinrichtung oder am Ausgang der Kühleinrichtung. Somit wird mittels des vorgeschlagenen Regelungsverfahrens erreicht, Haspeltemperaturen mit geringen Temperaturtoleranzen einzustellen und Unterschiede in den Geschwindigkeits- und Endwalz-Temperaturwerten über die Bandlänge weitgehend zu kompensieren.

30 **[0019]** Vorzugsweise umfaßt die Kühlstrecke mehrere Kühleinrichtungen. Als besonders bevorzugte Ausführungsform wird vorgeschlagen, daß obere und untere Stellglieder der Kühleinrichtungen unabhängig voneinander zur getrennten Kühlung der Bandober- bzw. Bandunterseite geregelt werden.

**[0020]** Vorteilhafterweise wird vorgeschlagen, eine Vorausberechnung des zu erwartenden Bandtemperaturverlaufs in Abhängigkeit des spezifischen Prozeßzustandes des zu kühlenden Gutes vor dessen Einlauf in die Kühlstrecke vor dem eigentlichen Regelungsprozeß durchzuführen. Mit Hilfe dieser vorgeschalteten Setup-Berechnung des Bandtemperaturverlaufs wird ein Arbeitspunkt für den sich anschließenden Regelvorgang geschaffen, der hierdurch schneller wird.

**[0021]** Durch die Einbeziehung thermophysikalischer und fluiddynamischer Beziehungen ist ein genaues Prozeßabbild im Regelzyklus gewährleistet.

**[0022]** Das erfindungsgemäße System setzt sich aus folgenden Einheiten nach Anspruch 8 zusammen:

- 40 eine Einheit zur Berechnung des Bandtemperaturverlaufs (Beobachter) in Abhängigkeit der aktuell eingestellten Prozeßparameter sowie des spezifischen Prozeßzustandes des Bandes; eine Einheit zur Vorausberechnung eines Referenz-Temperaturverlaufs in Abhängigkeit einer vorgegebenen Referenztemperatur ( $T_{\text{ref}}$ ) unter Berücksichtigung der Prozeßparameter und des Prozeßzustandes (Prediktor),
- 45 eine Vorrichtung zur Steuerung der Stellglieder der Kühleinrichtungen (1a bis 1i) der Kühlstrecke.

**[0023]** Nachfolgend wird das vorgeschlagene Verfahren bzw. System schematisch anhand der beiliegenden Figuren beschrieben. Hierbei zeigen:

50 Figur 1 eine schematische Funktions-Übersicht über das vorgeschlagene Regelungsverfahren;

Figur 2 bis 4 schematische Darstellungen von nacheinander ablaufenden Schritten des vorgeschlagenen Verfahrens;

55 Figur 5 eine schematische Übersicht der Systemelemente des Temperatur-Reglers;

Figuren 6,7 schematische Übersichten des thermodynamischen Ansatzes des Modells.

[0024] Figur 1 zeigt in schematischer Übersicht eine laminare Bandkühlanlage 1, die sich auf dem Auslaufrollgang einer Warmwalzbreitbandstraße zwischen dem letzten Walzgerüst 2 der Fertigstraße und dem Treiber 3a bzw. Haspel 3b befindet. Die Bandkühlanlage setzt sich aus mehreren Kühleinrichtungen 1a, 1b, 1c, 1d, 1e, 1f, 1g, 1h sowie 1i zusammen, die unabhängig voneinander und deren Stellglieder jeweils im Hinblick zur Bandober- und unterseite getrennt regelbar sind. Zwischen dem letzten Walzgerüst 2 der Fertigstraße und Beginn der Bandkühlanlage 1, gesehen in Transportrichtung des Bandes 4, ist ein erstes Pyrometer 5 zur Messung der Bandtemperatur vorgesehen. Ein zweites Pyrometer 6 befindet sich kurz vor dem Treiber 3a bzw. Haspel 3b.

[0025] Ferner sind in Figur 1 schematisch die einzelnen Schritte des erfindungsgemäßen Regelungszyklusses dargestellt.

[0026] Während des Walzens wird mittels des Kühlmodells ein Bandtemperaturverlauf berechnet (beobachtet), und die gemessene Haspel-Temperatur  $T_{meß}$  wird mit der entsprechenden berechneten Temperatur  $T_{calc}$  verglichen. Unter der gemessenen Haspel-Temperatur  $T_{meß}$  wird die Bandtemperatur verstanden, die mit Hilfe des Pyrometers 6 gemessen wird.  $T_{calc}$  ist der entsprechende diskrete Temperaturwert auf der beobachteten Temperaturkurve.

[0027] Es folgt zusätzlich die Adaption des Modells und die Übergabe des berechneten Temperaturverlaufs an den Temperaturregler.

[0028] Um die Schnelligkeit des Regelprozesses am Bandkopf zu steigern, ist dem Regelprozeß eine Setup-Berechnung vorgeschaltet. Es wird der Bandtemperaturverlauf in Abhängigkeit des spezifischen Prozeßzustandes des zu kühlenden Gutes vor dessen Einlauf in die Kühlstrecke vorausberechnet. Dieser vorausberechnete Bandtemperaturverlauf dient während des Walzprozesses als Arbeitspunkt für die Temperatur-Regelung.

[0029] Figur 2 stellt den mittels des Modells berechneten, d.h. beobachteten, Verlauf der Bandtemperatur [°C] über der Bandlänge [m] dar. Dieser erste Schritt des Regelkreises betrifft die Berechnung des Bandtemperaturverlaufs in der Kühlstrecke zwischen den Pyrometern 5 und 6 in Abhängigkeit der aktuell eingestellten Prozeßparameter mittels eines Modells, d.h. die sogenannte "Beobachtung". Die Kühlkurve weist im dargestellten Beispiel einen relativ starken Abfall im Bereich der ersten vier aktivierten Kühleinrichtungen 1a, 1b, 1c, 1d auf, um dann langsam abzufallen.

[0030] Während des Regelzyklusses wird in einem zweiten Schritt ein konkreter Endtemperaturwert  $T_{meß}$  an einem definierten Punkt des Bandes nach Durchlaufen der Kühlstrecke gemessen. Es handelt sich bei dem Endtemperaturwert vorzugsweise um die Temperatur des Bandes, kurz bevor es in die Haspelvorrichtung 3b einläuft. Sie wird mittels des Haspelpyrometers 6 gemessen.

[0031] Die Bandtemperatur in Höhe des Haspels hängt im wesentlichen von der zu erzeugenden Materialqualität ab und bewegt sich üblicherweise in einem Bereich von 250 bis 750°C.

[0032] Falls der konkrete Endtemperaturwert  $T_{meß}$ , d.h. die Haspeltemperatur, von dem entsprechenden Wert auf der berechneten Kurve abweicht, wie es in Figur 2 gezeigt ist, erfolgt eine Adaption zur Fehlerminimierung des Modells (vgl. Figur 3). Diese Adaption geschieht durch eine geeignete Veränderung der Modellparameter, so daß ein adaptierter Kurvenverlauf entsteht, auf dem die gemessene Haspeltemperatur liegt.

[0033] Auf Grundlage dieses jetzt fehlerminimierten Modells wird ein Referenztemperaturverlauf berechnet unter Zugrundelegen einer vorgegebenen Referenztemperatur  $T_{ref}$ , üblicherweise einer gewünschten Haspeltemperatur. Diesen Schritt zeigt Figur 4.

[0034] Dieser Verlauf geht von dem gleichen Anfangswert wie der erste berechnete Temperaturverlauf aus, aber von einem unterschiedlichen Endwert, d.h. dem Referenzwert  $T_{ref}$ .

[0035] Durch Vergleich des berechneten Temperaturverlaufs mit dem Referenztemperaturverlauf erfolgt eine individuelle Regelung jeder Kühlzone, getrennt für die Bandober- bzw. Bandunterseite. Diese Regelung geschieht hierbei mittels der Stellglieder der Kühleinrichtungen der Kühlvorrichtung.

[0036] Figur 5 zeigt schematisch die Einheiten des Systems zur Durchführung des vorgeschlagenen Verfahrens. Mit Hilfe des Prozeß-Beobachters bzw. Modells wird der Temperaturzustand des Bandes innerhalb der Kühlstrecke kontinuierlich beobachtet bzw. berechnet. Falls eine Abweichung zwischen berechneter und gemessener Haspeltemperatur festgestellt wird, kommt es zu einer Adaption des Modells, d.h. die berechnete Haspeltemperatur wird mit dem konkreten Meßwert  $T_{meß}$  abgeglichen.

[0037] Des weiteren liegt eine Einheit vor zur Berechnung des Referenz-Temperaturverlaufs, der sogenannte Prediktor. Diese Berechnung erfolgt zyklisch, um die richtige Prozeßführung innerhalb der Kühlstrecke zum Erreichen einer vorgegebenen Haspeltemperatur in Abhängigkeit von zeitabhängigen Prozeßstörungen wie Schwankungen der Bandgeschwindigkeit, Banddicke, Fertigstraßentemperatur etc. sicherzustellen.

[0038] Darüber hinaus ist ein Prozeß-Monitor-Regler vorgesehen, der das Gesamtsystem mit herkömmlichen regelungstechnischen Methoden, beispielsweise mit einem I-Regler, abgleicht, falls trotz Adaption des Modells noch eine Abweichung der erreichten von der vorgegebenen Haspeltemperatur vorliegt. Der Prozeß-Monitor kompensiert meßtechnisch nicht faßbare Störungen und Fehlfunktionen des Gesamtsystems und stellt damit eine einwandfreie Produktqualität durch den Abgleich der Referenz- und der aktuell gemessenen Haspeltemperatur sicher.

[0039] In Figur 6 wird sichtbar, daß jede Kühlzone per Vergleich mit dem zugehörigen Referenzwert individuell regelbar ist, wenn der aktuelle Verlauf der Bandtemperatur über der Bandlänge innerhalb der Kühlstrecke bekannt ist.

Das bedeutet, daß für beliebig viele diskrete Ortskoordinaten innerhalb der Kühlstrecke der Temperatur-Zustand des Bandes zu jedem Zeitpunkt bekannt sein muß. Der Verlauf der Bandtemperatur ist innerhalb der Kühlstrecke nicht meßbar, sondern muß modellhaft berechnet bzw. beobachtet werden.

5 [0040] Das dem vorgeschlagenen Verfahren zugrundeliegende mathematischen Modell zur Berechnung des Temperaturverlaufs des Bandes in der Kühlstrecke basiert auf folgenden thermodynamischen und strömungstechnischen Grundlagen.

10 [0041] Der Walzprozeß wird thermodynamisch als instationärer Fließprozeß in einem offenen System angenommen. Werden das Fertigstraßenpyrometer, das Haspelpyrometer sowie die Bandober- und unterseite als thermodynamische Systemgrenzen der Kühlstrecke gewählt, so strömt am Fertigstraßenpyrometer Masse sowie Energie in Form von Enthalpie in das System, am Haspelpyrometer Masse sowie Energie in Form von Enthalpie aus dem System und an der Bandober- und unterseite Energie in Form von Wärme aus dem System. Ferner wird zugrundegelegt, daß die Kühlstrecke in beliebig viele Teilprozesse unterteilt werden kann, daß das thermodynamische Gesamtsystem sich aus einer Kette von Teilprozessen zusammensetzt und daß für jeden Teilprozeß die Energie- und Massenbilanz erfüllt sein muß.

15 [0042] Allgemein gilt für die Bilanzierung einer extensiven Größe, wie z.B. der Energie, der Masse, dem Impuls usw., in einem beliebigen, jedoch raumfesten System die allgemeine Bilanzgleichung

$$20 \quad \frac{\partial e_v}{\partial t} = -\operatorname{div} \mathbf{i}_s + \Gamma_v \quad (1.1)$$

mit

25  $e_v$  die Dichte der extensiven Größe  
 $\mathbf{i}_s$  den pro Zeit- und Flächeneinheit durch die Oberfläche transportierten Strom der extensiven Größe  
 $\Gamma_v$  die pro Zeit- und Volumeneinheit produzierte oder vernichtete Menge der extensiven Größe

30 [0043] Die Massenbilanz für einen Teilprozeß stellt sich wie folgt dar. Die Masse des Systems setzt sich aus der Masse der Gefügeanteile  $p_i$  ( mit  $\sum p_i = 1$ ) zusammen mit  $p_i$  als Dichte und  $V$  als Volumen

$$m = \sum V_i \rho_i(T) \quad (1.2)$$

35 unter Vernachlässigung von Restanteilen folgt für ein Mischgefüge, bestehend aus Austenit ( $\gamma$ ) und Ferrit ( $\alpha$ )

$$m = V \cdot \rho(T) = V \cdot [(1-p(T)) \cdot \rho_\alpha + p(T) \cdot \rho_\gamma] \quad (1.3)$$

40 [0044] Für die spezifische Masse, d.h. der Dichte, folgt

$$45 \quad e_v = \rho(T) = \lim_{V \rightarrow 0} \frac{m}{V} = (1-p(T)) \cdot \rho_\alpha + p(T) \cdot \rho_\gamma \quad (1.4)$$

50 [0045] Aufgrund des Transportvorgangs fließt Masse per Massenstrom über die Systemgrenzen.

$$\mathbf{i} = \dot{m} = \rho(T) \cdot \dot{V} = \rho(T) \cdot \mathbf{s} \cdot \dot{z} \quad (1.5)$$

55

$$\mathbf{i}_v = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{\dot{\mathbf{m}}}{s} = \rho(T) \cdot \dot{\mathbf{z}} = [(1 - p(T)) \cdot \rho_\alpha + p(T) \cdot \rho_\gamma] \cdot \dot{\mathbf{z}} \quad (1.6)$$

mit  $\mathbf{s}$  als dem Oberflächenvektor und  $\dot{\mathbf{z}}$  als dem Geschwindigkeitsvektor.

[0046] Die pro Zeiteinheit produzierte oder vernichtete Masse des raumfesten Systems kann sich nur durch zeitliche Veränderung der Dichte ergeben. Mit 1.3 folgt

$$\Gamma_v = \lim_{V \rightarrow 0} \frac{\dot{m}}{V} = \dot{\rho}(T) = (\rho_\gamma - \rho_\alpha) \cdot \frac{dp(T)}{dT} \quad (1.7)$$

[0047] Unter Berücksichtigung, daß der Massenstrom nur in Koordinatenrichtung  $z_1$  (Längsrichtung) fließt, folgt für die Massenbilanz in kartesischen Koordinaten

$$\dot{\rho}(T) = -\dot{z}_1 \cdot \frac{d\rho(T)}{dz_1} + \dot{T} \cdot \frac{d\rho(T)}{dT} \quad (1.8)$$

[0048] Die Energiebilanz für einen Teilprozeß stellt sich wie folgt dar. Nach dem ersten Hauptsatz der Thermodynamik setzt sich die Energie eines Systems aus der Enthalpie sowie potentieller und kinetischer Energie zusammen. Da für das vorliegende ortsfeste System keine Änderung bezüglich der kinetischen und potentiellen Energie auftritt, berechnet sich die Energie  $E$  ausschließlich aus der Enthalpie  $H$  mit  $U$  = innerer Energie

$$E = H(T) = U(T) + m \cdot p \cdot V \quad (1.9)$$

und hieraus unter Vernachlässigung der Volumenänderungsarbeit  $p \cdot V$  mit  $u$  = spezifische Energie

$$e_v = \lim_{V \rightarrow 0} \frac{U(T)}{V} = \rho(T) \cdot u(T) \quad (1.10)$$

[0049] Über die raumfesten Systemgrenzen strömt Energie in Form von Wärme  $W$  und Enthalpie  $H$  mit  $h$  = spezifische Enthalpie

$$\mathbf{i} = \dot{H}(T) + \dot{Q}(T) = \dot{m} \cdot h(T) + \dot{s} \cdot \dot{q}(T) \quad (1.11)$$

$$\mathbf{i}_s = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{\mathbf{I}}{s} = \rho(T) \cdot \dot{\mathbf{z}} \cdot h(T) + \dot{q} \quad (1.12)$$

[0050] Je nach Abkühlgeschwindigkeit und Soll-Haspeltemperatur ist die frei werdende Reaktionsenergie während der Gefügeumwandlung ( $\gamma \rightarrow \alpha$ -Umwandlung) zu berücksichtigen.

[0051] Die Enthalpie des Bandes berechnet sich damit zu

$$H(T) = \sum \rho_i(T) H_i(T) \quad (1.13)$$



[0052] Unter Vernachlässigung von Restanteilen folgt für ein Mischgefüge, bestehend aus Austenit und Ferrit:

$$H(T) = \rho_{\alpha}(T) \cdot H_{\alpha}(T) + \rho_{\gamma}(T) \cdot H_{\gamma}(T) \quad (1.14)$$

5 [0053] Die pro Zeit- und Volumeneinheit produzierte oder vernichtete Energie berechnet sich zu

$$\Gamma = \dot{H}(T) = \dot{m}(T) \cdot h(T) + m(T) \cdot \dot{h}(T) \quad (1.15)$$

$$10 \quad \Gamma_{\nu} = \lim_{V \rightarrow 0} V = \dot{p}(T) \cdot [(\rho_{\gamma}(T) - \rho_{\alpha}(T)) \cdot h(T) + \rho(T) \cdot [h_{\gamma}(T) - h_{\alpha}(T)]] \quad (1.16)$$

15 [0054] Einsetzen der Gleichungen liefert unter Beachtung von

$$cp(T) = \frac{dh(T)}{dT} = \frac{du(T)}{dT} \quad (1.17)$$

20 mit  $cp$  = Wärmekapazität

$$25 \quad \dot{\mathbf{q}} = - \text{grad} \left( \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (1.18)$$

mit  $\lambda$  = Wärmeleitfähigkeit für kartesische Koordinaten die gesuchte Energiebilanzgleichung

$$30 \quad \rho(T) \cdot cp(T) \cdot \dot{T} = + \lambda(T) \cdot \left[ \frac{\partial^2 T}{\partial z_1^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z_2^2} \right] \\ 35 \quad - \rho(T) \cdot cp(T) \cdot \dot{z}_1 \cdot \frac{\partial T}{\partial z_1} + \dot{p}(T) \cdot [(\rho_{\gamma} - \rho_{\alpha}) \cdot h(T) + \rho(T) \cdot (h_{\gamma}(T) - h_{\alpha}(T))]$$

[0055] In (1.19) wird davon ausgegangen, daß für die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda(T)$  keine Richtungsabhängigkeit vorliegt. Die Wärmeleitung in Breitenrichtung wird vernachlässigt; ferner erfolgt der Enthalpiefuß ausschließlich in Längsrichtung der Kühlstrecke  $z_1$ .

40 [0056] Wird das Gesamtsystem in Subsysteme unterteilt, ergibt sich aus den Gleichungen (1.8) und (1.19) ein System von gekoppelten Differentialgleichungen. Das Einsetzen von beispielsweise Differenzenausdrücken liefert ein Netzwerk zur Berechnung des Temperaturzustandes über der Längenkoordinate  $z_1$  und Banddickenkoordinate  $z_2$ . Die Diskretisierung des Temperatur-Netzes erfolgt dabei in Längs- und Dickenrichtung mit nicht äquidistanten Abständen von Knoten zu Knoten (Figur 7).

45 [0057] Neben dem thermomechanischen Ansatz geht ein strömungstechnischer Ansatz in die Modellierung mit ein. Mit diesem Modell kann die Strömungsgeschwindigkeit des Kühlwassers beim Austritt aus der Kühleinrichtung berechnet werden. Die Strömungsgeschwindigkeit hat einen wesentlichen Einfluß auf die Berechnung der Wärmeübergangszahlen für die Bandober- bzw. Bandunterseite. Sie ergeben sich konkret aufgrund der hydro- und hydrodynamischen Beziehungen zwischen Tank und den Kühleinrichtungsrohren der Kupplung und damit der Gesamtentnahme  
50 des Kühlwassers aus dem Tank. Insbesondere das Zu- und Abschalten von Kühleinrichtungen hat einen Einfluß auf die Berechnung der aktuellen Wärmeübergangszahl, bis sich ein stationärer Strömungszustand eingestellt hat. Unter der Annahme, daß es sich bei dem Kühlwasser um ein reibungsfreies und inkompressibles Fluid handelt, gilt für die fluid-dynamische Beziehung von zwei Punkten des gleichen Stromfadens die instationäre Gleichung für inkompressible  
55 Fluide nach BERNOULLI:

$$\int_{(1)}^{(v)} \frac{\partial c}{\partial t} ds + \frac{c_v^2 - c_1^2}{2} + g \cdot (z_v - z_1) + \frac{p_v - p_1}{\rho} + \frac{\Delta p}{\rho} = 0 \quad (2.20)$$

mit

- $c_i$  Strömungsgeschwindigkeit an der Stelle  $i$   
 $s$  Stromfadenkoordinate  
 $z$  Höhenkoordinate der Stelle  $i$   
 $p_i$  Druck an der Stelle  $i$   
 $\Delta p$  Druckverlust durch Reibung und Einbauten  
 $v$  Austrittsort des Kühlwassers aus dem Rohrsystem  
 $\rho$  Dichte des Fluids  
 $g$  Konstante.

**[0058]** Bei der mechanischen Installation handelt es sich um geometrisch einfache Behälterformen und um eine Kette von Rohrabschnitten unterschiedlicher Durchmesser. Unter der Annahme unstetiger Rohrübergänge folgt unter Beachtung der Kontinuitätsgleichung:

$$c_{v+1} = \frac{A_v}{A_{v+1}} c_v \quad (2.21)$$

mit

- $n = v-1$  Stromfadenabschnitte  
 $A =$  Querschnittsfläche

aus (2.20) die gesuchte Differentialgleichung zur Beschreibung des instationären Strömungszustandes zwischen dem Wasserpegel im Hochbehälter und einem beliebigen Punkt  $v$  im Rohrleitungssystem.

$$\ddot{v}_v \cdot [a(z) + b_1] + b_2 \cdot \dot{v}_v^2 + b_3 \cdot g \cdot (z_v - z_p) + b_3 \cdot \frac{\Delta p}{\rho} = 0 \quad (2.22)$$

mit

$$a(z) = A_v^2 \cdot \int_{(12)}^{(v)} \frac{A_v}{A_{12}(z)} dz \quad \text{Hochbehälterfunktion} \quad (2.23)$$

$$b_1 = A_v^2 \cdot \sum_{i=2}^{v-1} \frac{A_{i+1}}{A_i} \cdot L_{Ri} \quad \text{Rohrsystemkonstante} \quad (2.24)$$

$$b_2 = \frac{1}{2} \cdot (A_v^2 - A_1^2) \quad \text{Querschnittkonstante} \quad (2.25)$$

$$b_3 = A_v^2 \quad \text{Ausflußkonstante} \quad (2.26)$$

$$\Delta p / \rho \quad \text{Druckverlust durch Einbauten und Rohrlängen} \quad (2.27)$$

[0059] Gleichung 2.22 beschreibt den instationären Strömungszustand eines einzelnen Kühlbalkens. Für die Modellierung des gesamten Stellsystems muß diese nichtlineare Differentialgleichung zweiter Ordnung für jeden Kühlbalken aufgestellt werden. Die Kopplung der  $n_K$  Differentialgleichungen erfolgt über die Kontinuitätsgleichung, da für den Wasserpegel des Hochbehälters

5

$$A_1(z) \cdot \dot{z}_1 = \dot{v}_p \cdot A_p + \sum_{i=1}^{n_K} A_{2i} \cdot \dot{v}_{2i} \quad (2.28)$$

10

mit

$A_p$  Rohrquerschnitt der Pumpe  
 $V_p$  durch Pumpen geförderter Volumenstrom

15

erfüllt sein muß.

### Patentansprüche

20

1. Verfahren zur Regelung einer Kühlstrecke, insbesondere der Kühlstrecke einer Walzstraße für Bleche und Bänder aus Stahl,  
**dadurch gekennzeichnet,**

25

daß der Regelkreis die folgenden zyklisch ablaufenden Schritte umfaßt:

Berechnung des Bandtemperaturverlaufs in der Kühlstrecke in Abhängigkeit der aktuell eingestellten Prozeßparameter sowie des spezifischen Prozeßzustandes des Bandes,

30

Vorausberechnung eines Referenztemperaturverlaufs unter Vorgabe einer Referenztemperatur ( $T_{ref}$ );

individuelle Regelung der Prozeßparameter der Kühlstrecke durch Vergleich des berechneten Temperaturverlaufs mit dem Referenztemperaturverlauf.

35

2. Verfahren nach Anspruch 1,  
**dadurch gekennzeichnet,**

daß das der Berechnung des Bandtemperaturverlaufs zugrundeliegende Modell mittels eines konkret aufgenommenen Temperaturmeßwertes ( $T_{meß}$ ) adaptiert wird.

40

3. Verfahren nach Anspruch 2,  
**dadurch gekennzeichnet,**

daß der konkret aufgenommene Temperaturmeßwert ( $T_{meß}$ ) die Temperatur des zu kühlenden Gutes kurz vor Eintritt in die Haspeleinrichtung (3b) ist.

45

4. Verfahren nach Anspruch 1,  
**dadurch gekennzeichnet,**

daß die Prozeßparameter der Kühlstrecke über Stellglieder von mehreren Kühleinrichtungen (1a, 1b, 1c, 1d bis 1i) einstellbar sind.

50

5. Verfahren nach Anspruch 4,  
**dadurch gekennzeichnet,**

55

daß obere und untere Stellglieder der Kühleinrichtungen unabhängig voneinander zur getrennten Beeinflussung der Bandober- bzw. Bandunterseite geregelt werden.

6. Verfahren nach Anspruch 4 oder 5,

**dadurch gekennzeichnet,**

daß die Stellglieder der Kühleinrichtungen die Anzahl der betätigten Kühlbalken und/oder die Menge- bzw. die Geschwindigkeit des Kühlwassers umfassen.

5

7. Verfahren nach Anspruch 1,  
**dadurch gekennzeichnet,**

10

daß der zu erwartende Bandtemperaturverlauf in Abhängigkeit des spezifischen Prozeßzustandes des zu kühlenden Gutes vor dessen Einlauf in die Kühlstrecke vor dem eigentlichen Regelungsprozeß vorausberechnet und die entsprechenden Prozeßparameter der Kühlstrecke eingestellt werden.

8. System zur Durchführung des Verfahrens nach den vorherigen Ansprüchen,  
**dadurch gekennzeichnet,**

15

daß es umfaßt:

eine Einheit zur Berechnung des Bandtemperaturverlaufs in Abhängigkeit der aktuell eingestellten Prozeßparameter sowie des spezifischen Prozeßzustandes des Bandes,

20

eine Einheit zur Vorausberechnung eines Referenz-Temperaturverlaufs in Abhängigkeit einer vorgegebenen Referenztemperatur ( $T_{ref}$ ),

eine Vorrichtung zur Steuerung der Stellglieder der Kühleinrichtungen (1a bis 1i) der Kühlstrecke.

25

9. System nach Anspruch 8,  
**dadurch gekennzeichnet,**

30

daß es ein Meßgerät (6) zur Ermittlung eines konkreten Temperaturwertes ( $T_{meß}$ ) des Bandes (4) sowie eine Einheit zur Adaption des der Berechnung zugrundeliegenden Modells umfaßt.

10. System nach Anspruch 9,  
**dadurch gekennzeichnet,**

35

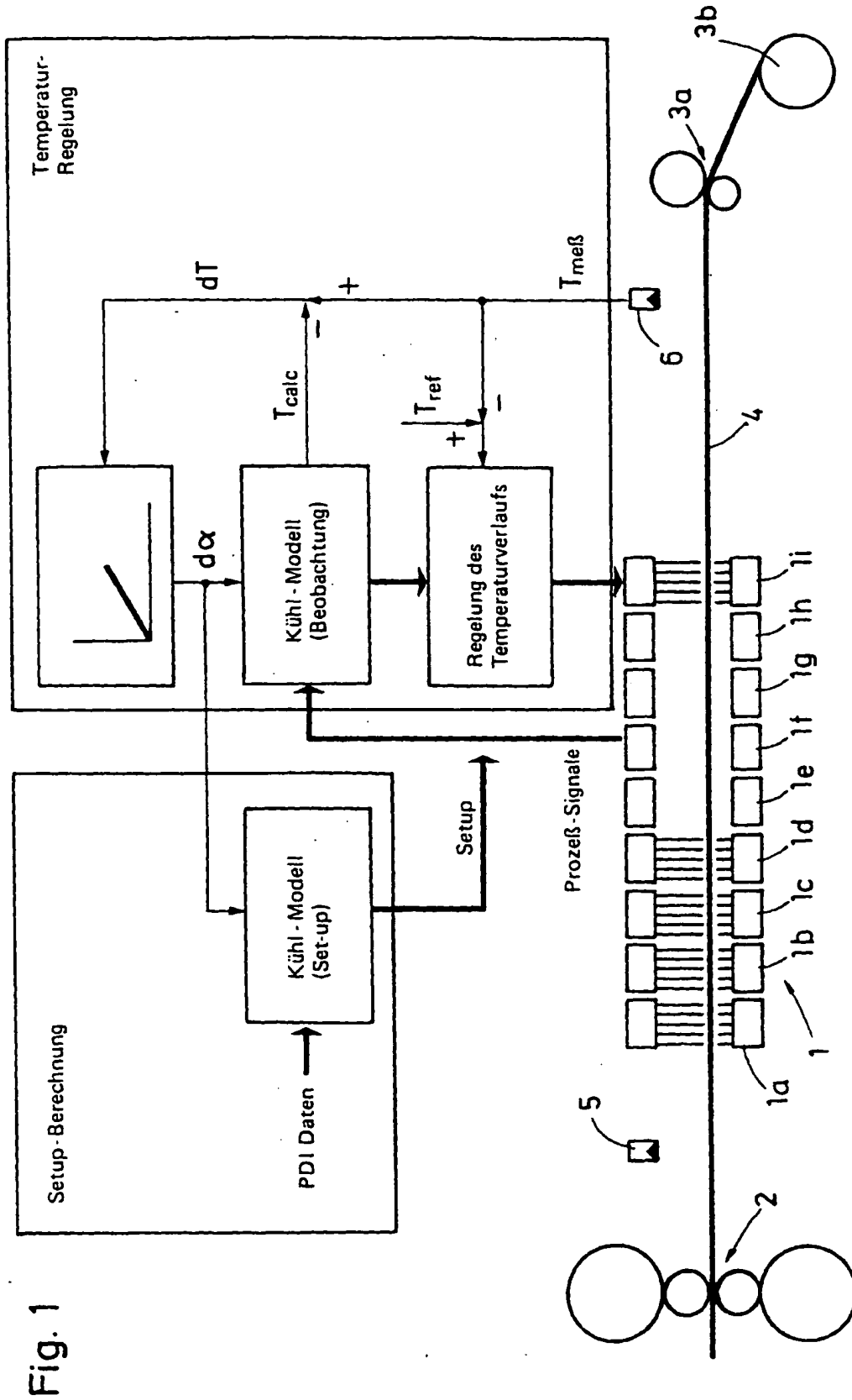
daß ein Prozeß-Monitor-Regler vorgesehen ist, der ein trotz Adaption fehlerbehaftetes Gesamtsystems abgleicht.

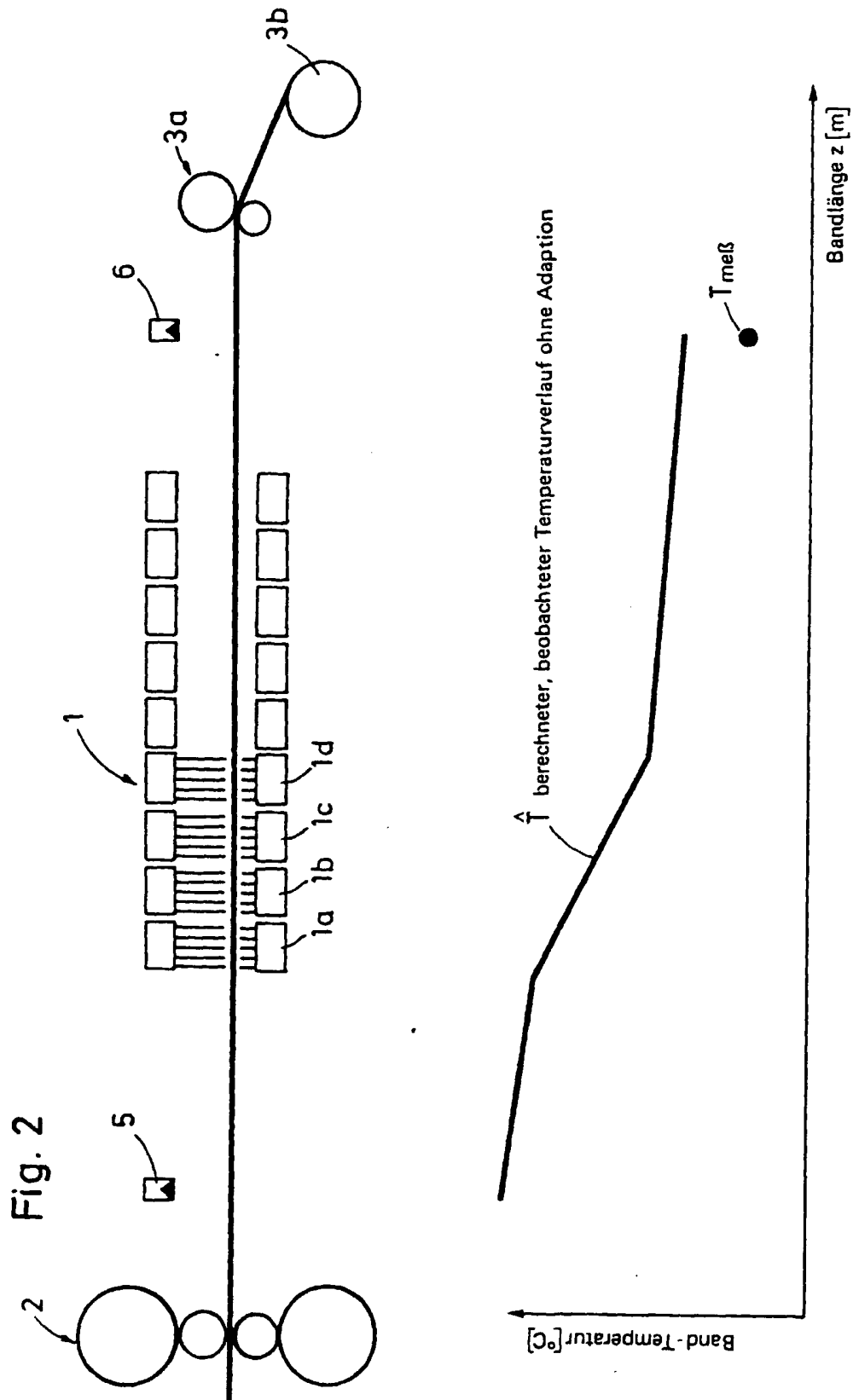
40

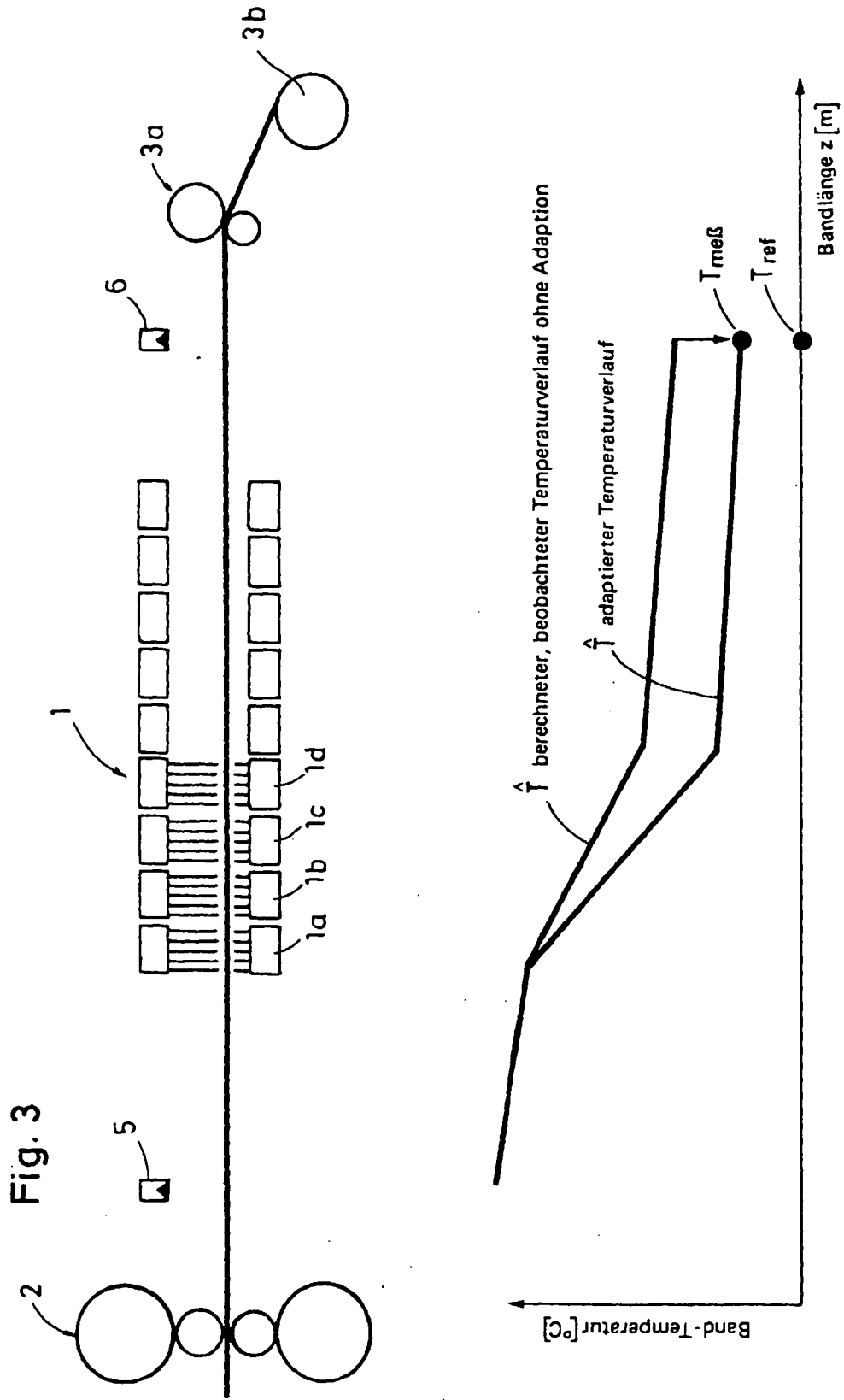
45

50

55







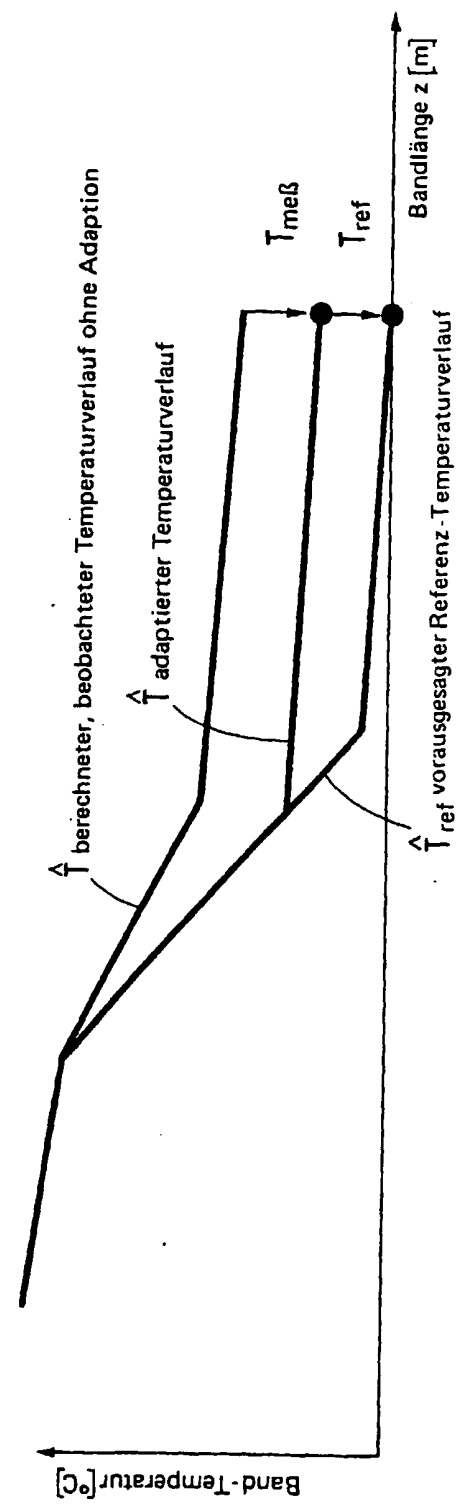
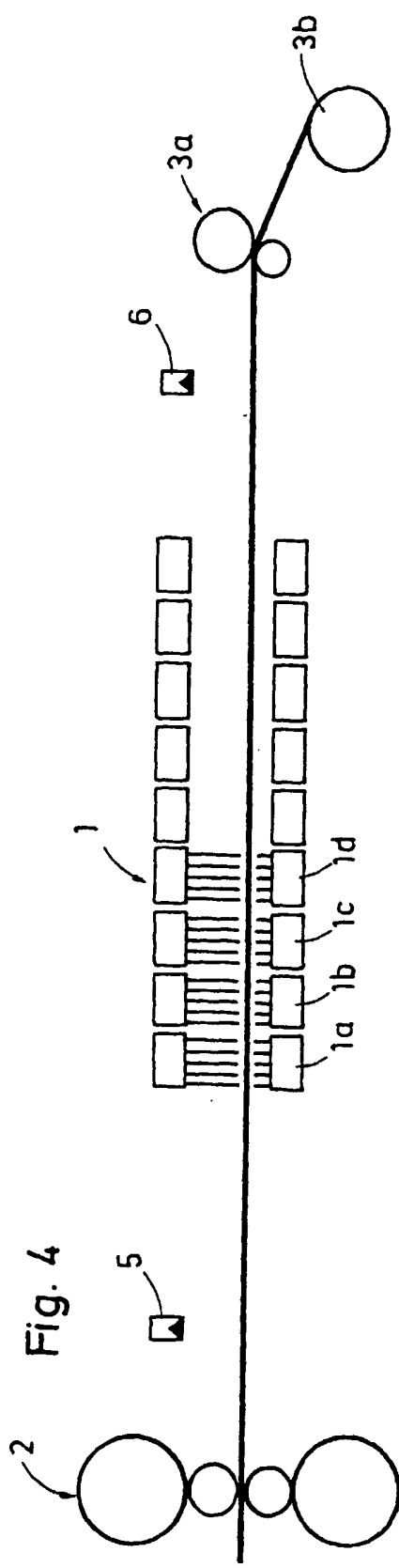
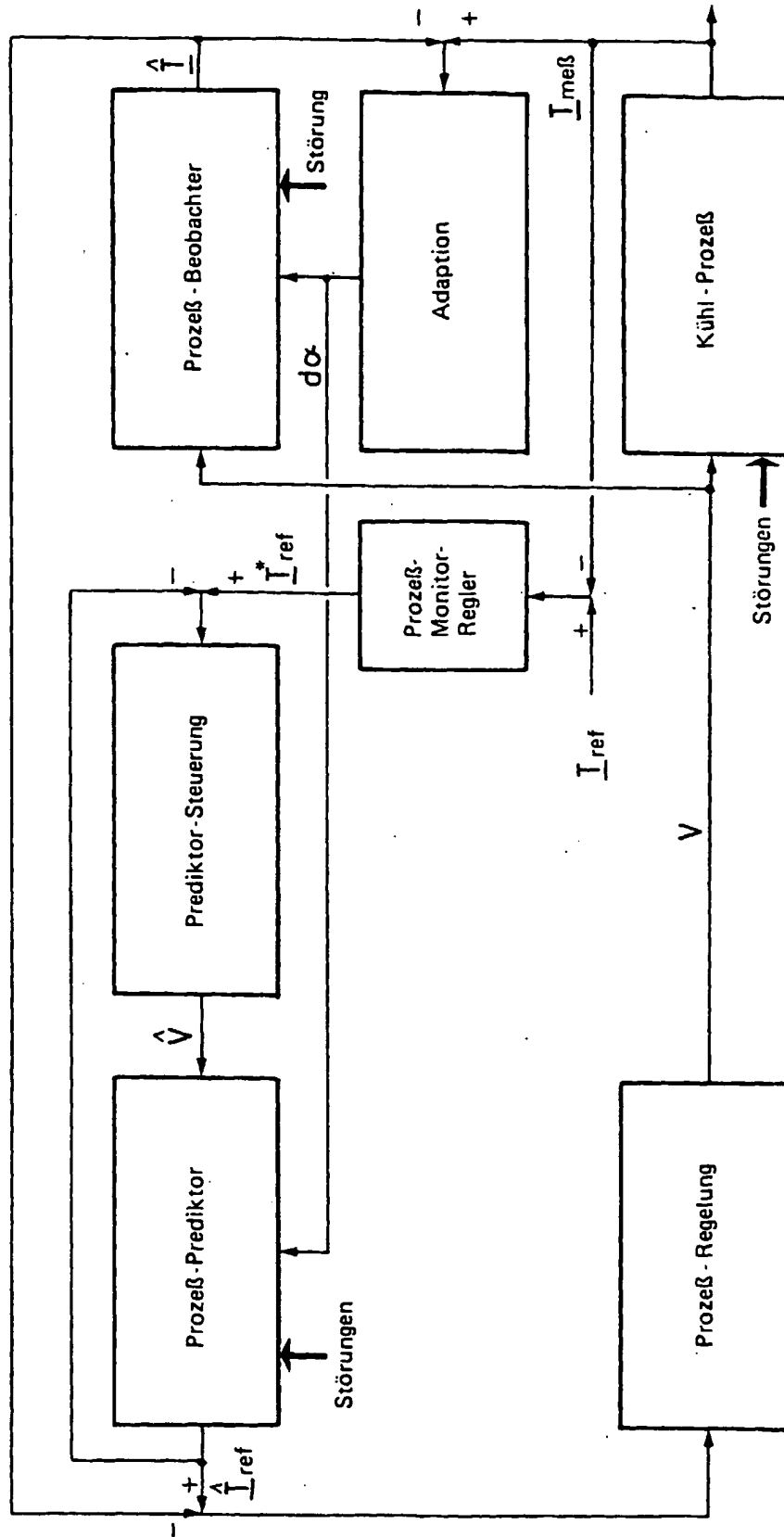
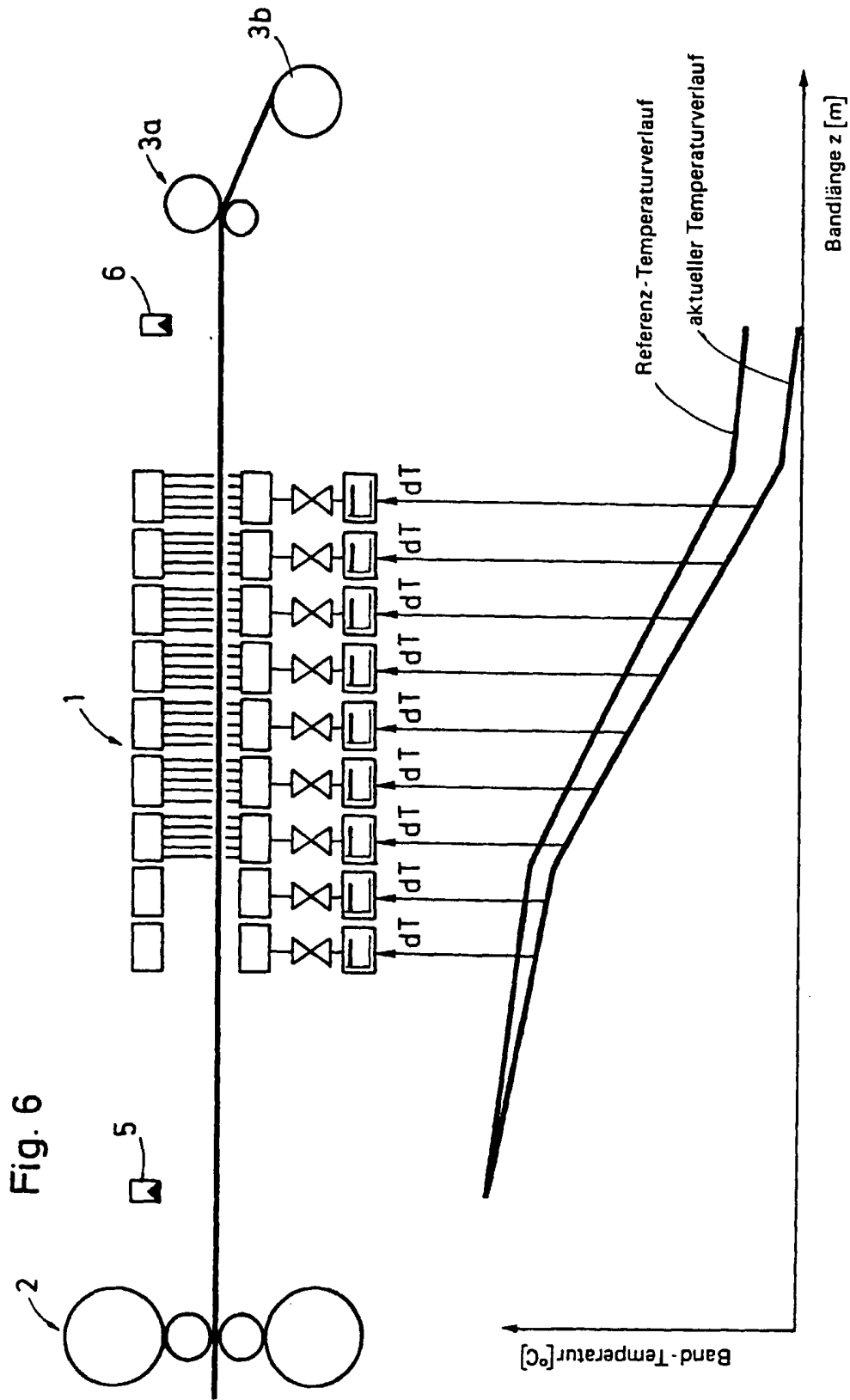
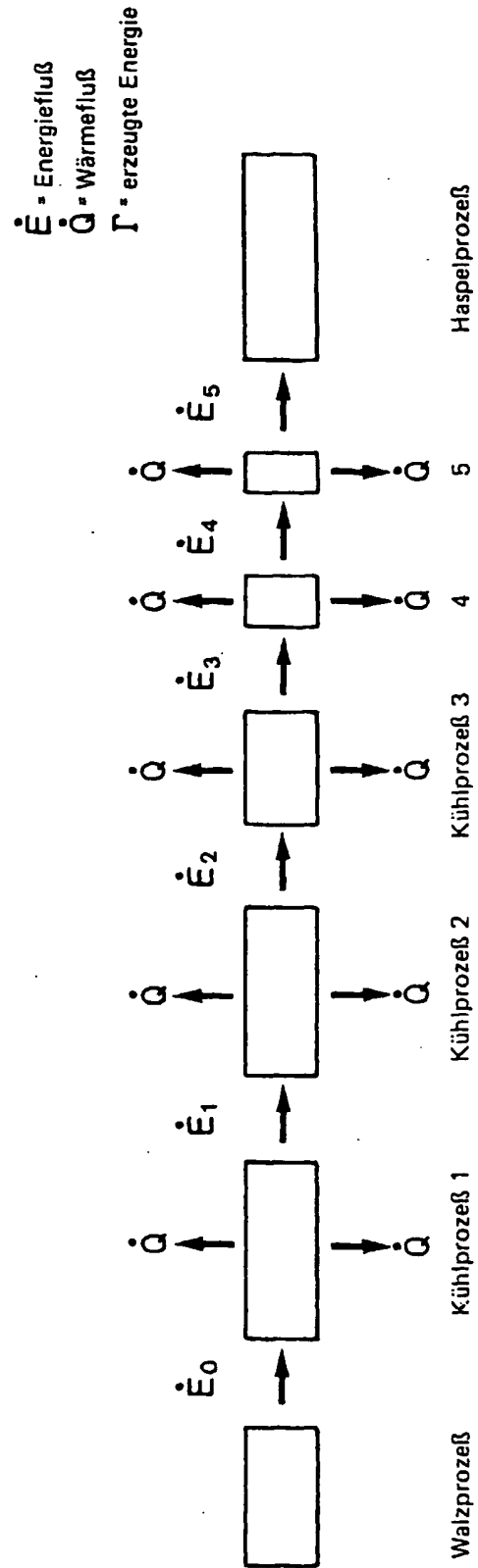
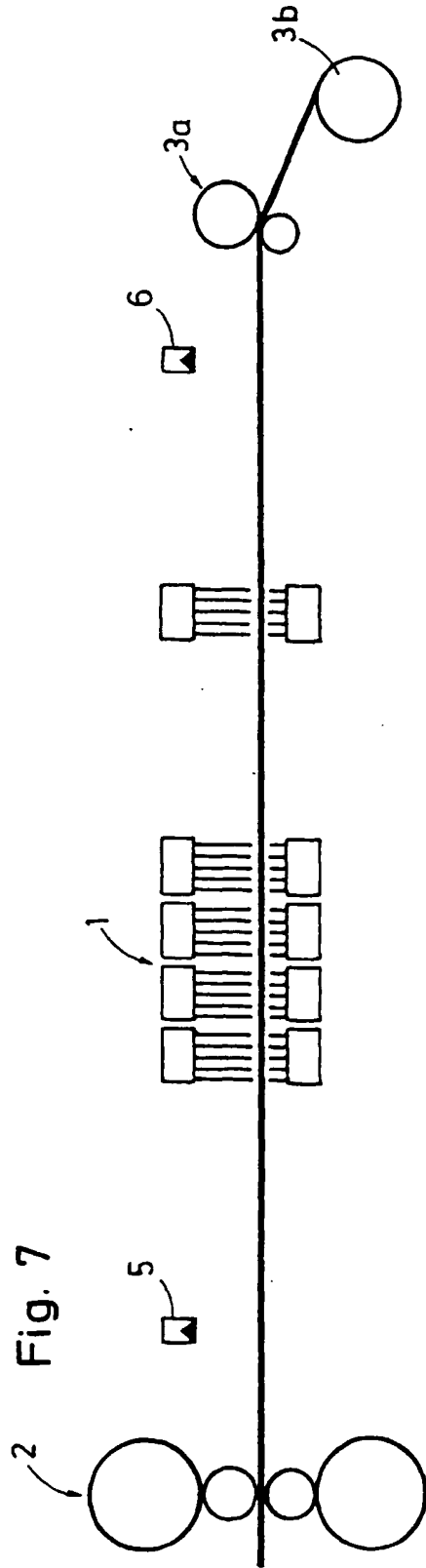




Fig. 5









Europäisches  
Patentamt

EUROPÄISCHER RECHERCHENBERICHT

Nummer der Anmeldung  
EP 99 11 9331

EINSCHLÄGIGE DOKUMENTE			
Kategorie	Kennzeichnung des Dokuments mit Angabe, soweit erforderlich, der maßgeblichen Teile	Betrifft Anspruch	KLASSIFIKATION DER ANMELDUNG (Int.Cl.7)
X	LEITHOLF M D ET AL: "MODEL REFERENCE CONTROL OF RUNOUT TABLE COOLING AT LTV" IRON AND STEEL ENGINEER,US,ASSOCIATION OF IRON AND STEEL ENGINEERS. PITTSBURGH, Bd. 66, Nr. 8, Seite 31-35 XP000069320 ISSN: 0021-1559 * Seite 31, rechte Spalte, Absatz 2 - Seite 32, rechte Spalte, Absatz 3 *	1-10	B21B37/76 C21D11/00
A	PATENT ABSTRACTS OF JAPAN vol. 018, no. 127 (M-1569), 2. März 1994 (1994-03-02) & JP 05 317941 A (NIPPON STEEL CORP), 3. Dezember 1993 (1993-12-03) * Zusammenfassung *	1-10	
A	PATENT ABSTRACTS OF JAPAN vol. 1997, no. 11, 28. November 1997 (1997-11-28) & JP 09 174136 A (MITSUBISHI ELECTRIC CORP), 8. Juli 1997 (1997-07-08) * Zusammenfassung *	1-10	
A	PATENT ABSTRACTS OF JAPAN vol. 016, no. 413 (C-0980), 2. September 1992 (1992-09-02) & JP 04 141531 A (NIPPON STEEL CORP), 15. Mai 1992 (1992-05-15) * Zusammenfassung *	1-7	B21B C21D
A	EP 0 453 566 B (KAWASAKI STEEL CO) 30. Oktober 1991 (1991-10-30) * Ansprüche 1,4-6 *	1-7	
A	EP 0 829 548 A (MANNESMANN AG) 18. März 1998 (1998-03-18) * Ansprüche 1-5 *	1	
Der vorliegende Recherchenbericht wurde für alle Patentansprüche erstellt			
Recherchenort <b>BERLIN</b>		Abschlußdatum der Recherche <b>9. Februar 2000</b>	Prüfer <b>Kesten, W</b>
KATEGORIE DER GENANNTEN DOKUMENTE X : von besonderer Bedeutung allein betrachtet Y : von besonderer Bedeutung in Verbindung mit einer anderen Veröffentlichung derselben Kategorie A : technologischer Hintergrund O : mündliche Offenbarung P : Zwischenliteratur		T : der Erfindung zugrunde liegende Theorien oder Grundsätze E : älteres Patentdokument, das jedoch erst am oder nach dem Anmeldedatum veröffentlicht worden ist D : in der Anmeldung angeführtes Dokument L : aus anderen Gründen angeführtes Dokument & : Mitglied der gleichen Patentfamilie, übereinstimmendes Dokument	

EPO FORM 1503 03/92 (P04C03)

**ANHANG ZUM EUROPÄISCHEN RECHERCHENBERICHT  
ÜBER DIE EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG NR.**

EP 99 11 9331

In diesem Anhang sind die Mitglieder der Patentfamilien der im obengenannten europäischen Recherchenbericht angeführten Patentdokumente angegeben.  
Die Angaben über die Familienmitglieder entsprechen dem Stand der Datei des Europäischen Patentamts am  
Diese Angaben dienen nur zur Unterrichtung und erfolgen ohne Gewähr.

09-02-2000

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
JP 05317941 A	03-12-1993	JP 2961464 B	12-10-1999
JP 09174136 A	08-07-1997	KEINE	
JP 04141531 A	15-05-1992	KEINE	
EP 0453566 B	30-10-1991	WO 9015885 A	27-12-1990
		DE 68928639 D	14-05-1998
		DE 68928639 T	30-07-1998
		EP 0453566 A	30-10-1991
		KR 9507469 B	11-07-1995
EP 0829548 A	18-03-1998	CN 1205920 A	27-01-1999
		DE 19639062 A	26-03-1998
		US 5891275 A	06-04-1999

EPO FORM P0461

Für nähere Einzelheiten zu diesem Anhang : siehe Amtsblatt des Europäischen Patentamts, Nr.12/82

This Page Blank (uspto)